ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ПРОВОДОВ

ДЕНИС ФОЙХТ (DENNIS FEUCHT), Innovatia Laboratories

Алюминиевые провода, как правило, не используются в трансформаторах и дросселях (реакторах) импульсных силовых преобразователей. Однако алюминиевые провода имеют преимущества над медными при высоких частотах за счет меньшей удельной электропроводности, т.к. толщина скин-слоя у алюминия больше, чем у меди, при одинаковой частоте. Таким образом, сопротивление алюминиевых проводов меньше, чем медных, при равной длине и площади поперечного сечения. В статье рассматриваются условия, при которых реализуются эти преимущества.

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ

Для проводов из алюминия (Al) и меди (Cu), отношение сопротивлений Al и Cu при типовой рабочей температуре 80°C определяется следующим образом:

$$\frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} = \frac{3{,}487}{2{,}131} = 1{,}637.$$

Другими словами, сопротивление провода из алюминия на 64% больше, чем медного провода тех же размеров.

Плотность импульсного тока в проводе круглого сечения максимальна на поверхности проводника за счет поверхностного эффекта. Плотность тока экспоненциально уменьшается вдоль радиальной оси провода от его поверхности к центру. Глубина скин-слоя δ определяет кольцевую зону, в которой протекает ток. Если бы его величина была равномерно распределена вдоль этого кольца, она равнялась бы суммарному току с экспоненциальным распределением.

Таким образом, при заданной частоте переключения fs и радиусе сечения проводника r_c скин-эффект минимизируется при $r_c \le \delta$. Толщина скин-слоя у медного проводника при 80°C равна

$$\delta_{Cu} \approx \frac{73{,}5\ \text{мм} \cdot \sqrt{\text{Гц}}}{\sqrt{f}}.$$

У алюминиевого проводника при той же температуре

$$\delta_{Al} \approx \frac{94\ \text{мм} \cdot \sqrt{\text{Гц}}}{\sqrt{f}}.$$

При той же частоте глубина скин-слоя у алюминия больше, чем у меди, хотя у него больше сопротивление по постоянному току. Меньшее сопротивление алюминия за счет большей площади поперечного сечения делает применение Al более выгодным, чем медного провода, при определенных условиях.

ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМОЕ СООТНОШЕНИЕ F_R

Отношение полного (по переменному току) сопротивления провода круглого сечения на частоте f к сопротивлению по постоянному току R0 определяется следующим образом:

$$F_R = \frac{R(f)}{R_0}.$$

Следовательно, полное сопротивление при поверхностном эффекте определяется как

$$R(f) = R_0 \cdot F_R.$$

Величина поверхностного эффекта для данного радиуса проводника определяется следующим образом:

$$\xi = \frac{r_c}{\delta}.$$

Частота f_δ, при которой $\delta = r_c$, определяется из уравнения толщины скин-слоя при заданной f:

$$f_\delta = \left(\frac{73{,}5\ \text{мм} \cdot \sqrt{\text{Гц}}}{r_c}\right)^2, \text{ Cu, 80°C;}$$

$$f_\delta = \left(\frac{94\ \text{мм} \cdot \sqrt{\text{Гц}}}{r_c}\right)^2, \text{ Al, 80°C.}$$

Например, у провода 28 AWG_{rc} = = 0,16 мм, а $f_{\delta Cu}$ = 211 кГц.

Значения f_δ используются в качестве дополнительного параметра при выборе провода. Зная f_δ для каждого размера провода, частоту тока f, а также то, что δ пропорциональна 1/√f, получаем:

$$\xi = \sqrt{\frac{f}{f_\delta}}.$$

Таким образом, при f = 150 кГц у провода 24 AWG и соответствующей f_δ = 81,15 кГц величина ξ = 1,36.

ОТНОШЕНИЕ F_R ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ЭФФЕКТЕ

Выражение для F_R в случае с изолированным (одним) проводником круглого сечения переписывается в виде

$$F_R = \frac{R(f)}{R_0} = \frac{A_0}{A(f)}.$$

При 0 Гц ток равномерно распределяется по всей поперечной площади сечения проводника .

На частоте f площадь поперечного сечения проводника, через которую проходит ток, рассчитывается по формуле:

$$A(f) = \pi(2r_c\delta - \delta^2).$$

Следовательно:

$$F_R = \frac{\xi^2}{2\xi - 1}.$$

Отношение сопротивлений алюминиевого и медного проводов с одинаковой длиной и радиусом определяется следующим образом:

$$\frac{R_{Al}(f)}{R_{Cu}(f)} = \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}} \cdot \frac{F_{R_{Al}}}{F_{R_{Cu}}}.$$

Из предыдущих уравнений получаем соотношение для δ:

$$\frac{\delta_{Al}}{\delta_{Cu}} = \sqrt{\frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}}} \approx 1{,}279.$$

Подставив эту формулу в отношение сопротивлений, получим:

$$\frac{R_{Al}(f)}{R_{Cu}(f)} = \cong \frac{2\xi_{Cu} - 1}{1{,}564\xi_{Cu} - 1} > 1.$$

При одинаковом радиусе r_c у алюминиевого провода больше сопротивление R(f), чем у медного изолированного провода (с учетом только поверхностного эффекта). При $\xi \to \infty$ данное соотношение стремится к δ_{Al}/δ_{Cu}, или величине 1,279.

Original size.

КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ОТ ОДНОГО ПРОИЗВОДИТЕЛЯ.

Точное определение координат и надежную передачу данных гарантируют новый автономный GPS|ГЛОНАСС модуль Юпитер SL869 и M2M модули от мирового лидера, компании Telit.

Юпитер SL869 поддерживает основные навигационные спутниковые системы – GPS, ГЛОНАСС, Galileo и QZSS – и уже сейчас, в комбинированном режиме GPS+ГЛОНАСС, он обладает возможностью самого точного определения координат на сегодняшний день.

Юпитер SL869 оснащен высокопроизводительным процессором ARM9 с внутренней флэш-памятью для расширенных эфемеридных данных и пользовательских программных приложений, что обеспечивает время первого определения местоположения (TTFF) менее 1 секунды при горячем старте и менее 35 секунд при холодном старте.

В сочетании с GSM модулями Telit, в которых уже интегрирована поддержка технологии eCall/ЭРА-ГЛОНАСС, например: GE864-QUAD Automotive V2, GE865-QUAD, GL865-QUAD, Вы получите непревзойденное решение для определения координат и передачи данных.

Важным преимуществом является тот факт, что Вы приобретаете все модули из одних рук. В сочетании с международной системой качества, разработки и послепродажного обслуживания компании Telit, Ваша M2M система будет конкурентной и гораздо быстрее окажется на рынке. Telit – самая быстрорастущая инновационная компания в сфере M2M, обеспечивает Вас непревзойденным набором модулей у сервисов. Мы надеемся поддержать Вас.

With Telit knowhow, you know – now
www.telit.com

Присоединяйтесь к форуму технической поддержки Telit:
www.telit.com/techforum

www.telit.com/ebook
www.telit.com/techforum
www.telit.com/facebook
www.telit.com/twitter

QUALITY
INVESTMENT PROTECTION
BUSINESS SCALABLE
EASE OF INTEGRATION

Telit® wireless solutions
Making machines talk.®

РЕКЛАМА

ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ

Чтобы выбор алюминиевого провода был предпочтительным, полученное отношение сопротивлений должно быть меньше единицы. Увеличения параметра δ для Al недостаточно, чтобы компенсировать рост ρ при поверхностном эффекте изолированного проводника.

Неодинаковая плотность тока в проводе наблюдается также из-за влияния токов в соседних проводах. Это явление называется эффектом близости. При использовании многожильного провода влияние этого эффекта усиливается, и при определенных условиях преимущество алюминиевого провода над медным становится явно выраженным. В моточных изделиях эффект близости, как правило, преобладает над поверхностным эффектом, приводя к увеличению F_R. Воспользовавшись формулами, графиками и таблицами из соответствующих источников, мы обстоятельно проанализировали влияние поверхностного эффекта и эффекта близости на выбор материала провода для обмотки магнитных элементов.

На рисунке 1 представлены кривые зависимости F_{Rw} в условиях поверхностного эффекта и отсутствия эффекта близости для медного провода при f = 150 кГц. Поскольку отношение F_{Rw} относительно невелико, значения графика увеличены в 10 раз. F_{Rw} монотонно растет с увеличением ξ, и при ξ >> 1, когда скин-эффект превалирует над эффектом близости, предельное значение тангенса угла наклона кривой составляет ½.

F_{RS} — отношение F_R для одножильного провода с учетом эффекта близости. Кривая F_{RS}, все значения которой увеличены в два раза, представлена совместно с графиком производной $dF_{Rs}/d\xi = D_{FRs}(\xi)$, увеличенξм в 10 раз (см. рис. 1). При ξ ≥ 3 тангенс угла нξклона F_{Rs} стремится к 1,77, а при ξ ≥ 4 — к 1,772. При увеличении числа жил m тангенс угла наклона увеличивается. Из рисунка 1 видно, что F_{Rs} аппроксимируется линейной функцией:

$$F_{Rs}(\xi) \approx 1{,}772\xi.$$

Наибольшая погрешность этой аппроксимации при ξ ≥ 1,5 составляет 1,1% (ξ ≈ 1,9). При 0,5 < ξ < 1,5 погрешность достигает ±12 %, а при значениях меньших 0,5 эта аппроξсимация не годится.

Задача в том, чтобы при расчетных ξ и m минимизировать F_R. Величина ξ связана с размером провода, и при данном числе витков и токе обмотки в конкретной катушке она может влиять на m.

Минимизация ξ путем использования большого числа проводов малого размера может привести к чрезмерно большим m и F_R. Иногда минимизация $F_R(\xi)$ достигается за счет увеличения ξ при уменьшении m. Это ограничивает преимущество использования большого числа проводов малого размера вместо одного провода. Провод, состоящий из множества сплетенных проводников (литцендрат), нейтрализует эффект многожильности. Чередующиеся слои с противоположным направлением тока компенсируют создаваемое ими магнитное поле.

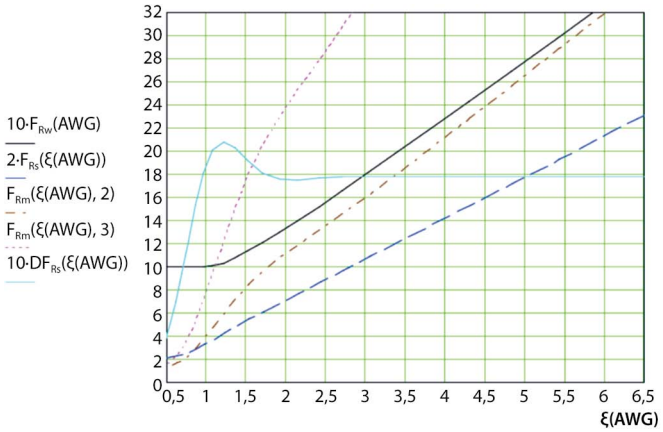

Рис. 1. **Кривые FR для медных проводов при f = 150 кГц**

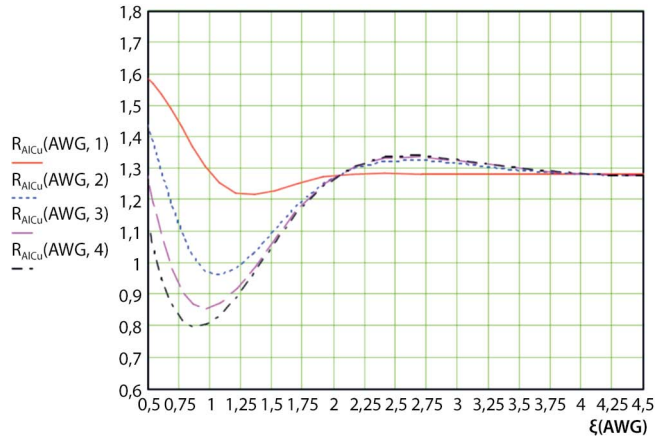

Рис. 2. **Графики отношения сопротивлений алюминия к меди** (R_{AlCuw}(AWG)) **с учетом поверхностного эффекта одиночного провода разных размеров** (AWG) **и *m-жильного провода в зависимости от параметра ξ***

Графики отношения сопротивлений алюминия и меди с учетом поверхностного эффекта для одиночного провода в зависимости от ξ(AWG) представлены на рисунке 2. Отношение R_{AlCuw}(AWG) определяется как

$$\frac{R_{Al}}{R_{Cu}} = \frac{\rho_{Al}(T)}{\rho_{Cu}(T)} \cdot \frac{F_{RwAl}(AWG)}{F_{RwCu}(AWG)}.$$

Значения графиков рассчитываются из следующего соотношения:

$$\frac{R_{Al}}{R_{Cu}} = \frac{\rho_{Al}(T)}{\rho_{Cu}(T)} \cdot \frac{F_{Rm}(\xi_{Al}(AWG), m)}{F_{Rm}(\xi_{Cu}(AWG), m)},$$

где $F_{Rm}(\xi, m)$ — отношение F_R для m-жильного провода и заданного значения ξ. В нижней части рисунка представлены те же кривые как функция AWG при f = 150 кГц, где $f = f_\delta$ для провода 27 AWG.

Ни одно из значений кривых R_{Al}/R_{Cu} (R_{AlCuw}) для одиночного провода с учетом поверхностного эффекта не ниже единицы. Сопротивление медного изолированного провода в этом случае всегда меньше, чем алюминиевого. Из графика рисунка 3 для одножильного провода при f = 150 кГц видно, что наименьшая разница между сопротивлениями алюминия и меди составляет около 22%, что наблюдается для медного провода 25 AWG при f_δ = 167 к Гц.

Однако это отношение меняется уже при m = 2. Из графика видно, что сопротивление алюминия уменьшается в очень узком диапазоне значений — при 0,9 < ξ < 1,25 и 150 кГц для провода распространенных размеров 24–30 AWG. Таким образом, на частотах $f_{\delta Cu}$ = 83–346 кГц, соответствующих медным проводам этих размеров, ξ алюминиевого провода сопротивление меньше. Например, оно меньше на 5% в случае провода 26 AWG при ξ ≈ 1,1, что соответствует частоте $f_{\delta Cu}$ = 129 кГц.

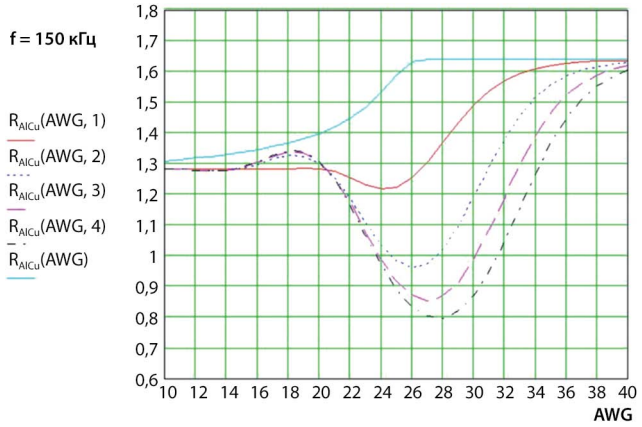

Рис. 3. **Графики отношения сопротивлений алюминия к меди (R_{AlCuW}(AWG)) с учетом поверхностного эффекта одиночного провода при f = 150 кГц в зависимости от сечения провода**

Если m = 3, преимущество алюминиевого провода еще заметнее. Разница максимальна при использовании провода размером 26 AWG, что соответствует $f_{\delta Cu}$ = 162 кГц. Диапазон размеров алюминиевого провода также увеличивается с 24 до 30 AWG, а максимальная разница в значениях сопротивлений достигает 14%. При m = 4 преимущество использования алюминиевого провода максимально (21%) для размера 28 AWG ($f_{\delta Cu}$ = 204 кГц и меньше единицы в диапазоне 24–31,5 AWG.

По мере увеличения m значение ξ немного уменьшается, а при m = 4 ξ ≈ 0,85. При ξ > 2 отношение сопротивлений δ_{Al}/δ_{Cu} стремится к 1,279, а поверхностный эффект настолько велик, что число жил практически не влияет на отношение сопротивлений. Применение алюминиевых проводов становится предпочтительнее в случаях, когда доминирует эффект близости (ξ < 0,5) и поверхностный эффект (ξ > 2).

Обычно в моточных изделиях используются провода 24–32 AWG с числом жил m ≥ 2. При таких параметрах сопротивление алюминиевого провода меньше, чем у медного, при одинаковых диаметрах и частоте 150 кГц. Более широкий диапазон значений ξ у многожильных обмоток также обеспечивает преимущество использования алюминиевого провода в меняющемся диапазоне частот при изменении коэффициента заполнения импульсов преобразователя. Помимо того, что стоимость алюминиевых проводов меньше, чем медных, у Al лучшие характеристики при таких рабочих параметрах.

Как правило, обмотки магнитных элементов создаются из нескольких параллельных жил небольшого размера, что позволяет уменьшить ξ. На высоких частотах переключения и при больших токах количество жил увеличивается, и проектирование обмоток усложняется. При большем значении A(f) алюминиевого проводника используется провод большего размера, чтобы уменьшить число жил.

Таким образом, сопротивление алюминиевого провода при определенных условиях может быть меньше, чем у медной многожильной обмотки. У алюминиевого провода по сравнению с медным имеются и другие преимущества: меньшая цена, плотность, ковкость и лучшая способность пайки к выводам катушки или контактным площадкам платы.

РЕКЛАМА